

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКА РАДОНА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГОЛЬНЫХ СОРБЕНТОВ

С. В. Бартанова, А. В. Перевалов, А. Б. Цыденов

Геологический институт СО РАН, Россия

Поступила в редакцию 8 июня 2017 г.

Аннотация: рассмотрены возможности использования сорбентов для измерения потока радона на поверхности земли при поисково-разведочных работах, определения тектонической активности разломов и для оценки радоноопасности территорий. Использование угольного сорбента позволяет выполнить измерение потока радона в различных природно-климатических условиях с приемлемой точностью. Экспериментально определена оптимальная геометрия измерения потока радона и выполнена оценка влияния переходных процессов на точность результатов. Опыт практического применения методики измерения эксхалации радона с использованием сорбционных модулей показал, что методика достаточно эффективна при выявлении и уточнении положения урановых рудных тел, нефтяных залежей, для картирования активных разломов и определения опасных концентраций радона.

Ключевые слова: радон, поток радона, угольный сорбент, гамма-излучение, активность радона, уран

MEASUREMENT OF RADON FLUX FROM THE SOIL SURFACE WITH USE OF COAL SORBENTS

Abstract: the possibilities of use of sorbents for measurement of radon flux from the soil surface at exploration are considered, definitions of tectonic activity of faults and for an assessment of Radon danger area. It is shown that use of a coal sorbent allows to execute measurement of a stream of radon in various climatic conditions with the acceptable accuracy. The optimum geometry of measurement of radon flux is experimentally defined and the assessment of influence of transition processes on the accuracy of results is executed. Experience of practical application of a technique of measurement of radon exhalation with use of sorption modules has shown that the technique is rather effective at identification and specification of position of uranium ore bodies, oil pools, for mapping of active breaks and definition of dangerous concentration of radon.

Keywords: radon, radon flux, coal sorbent, gamma radiation, activity of radon, uranium.

Введение

Обязательным элементом работ по оценке радиологической обстановки территории и поисках уранового сырья является измерение концентрации радона в воздухе, воде и его потока на поверхности земли. Хорошо известно, что радон с дочерними продуктами распада ответственен за половину дозы облучения, получаемой человеком от естественных источников [1]. Для оценки радиационного риска проводятся работы, включающие определение объемной активности (ОА) радона в помещениях, выявление радоноопасных территорий, отводимых под строительство зданий. Также, свойства радона как радиоактивного газа позволяют его использовать для картирования активных разломов [2].

Известны следующие методики измерения концентрации радона [3,4,5]:

- измерение потока радона на поверхности с использованием сорбента.
- измерение объемной активности (ОА) радона с использованием полупроводниковых детекторов альфа-излучения.
- измерение ОА радона по активности продуктов его распада, уловленных фильтром после прокачки через него исследуемого воздуха.
- измерение ОА радона с использованием эманационно-трековых или термoluminesцентных детекторов.

В настоящее время широкое распространение получили методики, в которых используется улавливание радона, выделяющегося в воздух с использованием угольных и других сорбентов. Сорбционные методики отличаются геометрией измерения, которая включает выбор способа пробоотбора, конструкции и состава пробоотборного контейнера [6, 7].

Прямые определения небольших концентраций радона (<1000 Бк/м³) в воздухе посредством сцинтилляционной камеры или полупроводникового детектора при всей их простоте и удобстве малоэффективны, вследствие возрастания времени измерения или предварительного концентрирования измеряемого компонента из большого объема, с последующим переводом его в детектор. Проблема увеличения времени экспозиции свойственна методике, использующей эманационно-трековые и термолюминесцентные детекторы, экспозиция которых на точке наблюдения доходит до нескольких недель [8]. Необходимость концентрирования возникает в методиках, основанных на осаждении продуктов распада радона на фильтры при прокачке достаточно больших объемов воздуха [1]. При этом на фильтре определяется ОА продуктов распада радона. В целом, сравнительное испытание различных методик измерения ОА радона в почвенном воздухе показало, что данные практически не различаются в пределах ошибки [9].

Таким образом, основными критериями выбора конкретной методики можно считать количество необходимых измерений и время получения конечного результата.

Методика измерений потока радона с использованием угольного сорбента

Основной принцип использованного метода измерения эксхалляции радона заключается в следующем: на точке наблюдения устанавливается сорбционное устройство, представляющее собой металлический сетчатый цилиндр объемом 280 см³, заполненный активированным углем марки БАУ, под крышкой. Объем сорбционного модуля определяется размером колодца гамма-спектрометрической установки. Сорбционный модуль большого объема позволяет увеличить время сорбции до 12–15 часов. При этом поглощение паров воды и попутных газов (углекислый газ, кислород, сероводород, азот, метан и т.д.) не влияет на сорбцию радона. После экспонирования модуль извлекается из-под крышки и помещается в герметичный контейнер. Через три часа после наступления равновесия между радоном и его короткоживущими продуктами распада, производится определение количества уловленного радона. Время измерения сорбционного модуля составляет 4 минуты, что позволяет выполнять до 100 измерений за рабочий день.

Измерение ОА радона в угольных модулях производится по гамма-активности его дочернего элемента Bi-214. Гамма-спектрометрическая установка собрана на основе детектора, кристалл NaI(Tl) размером 200×200 мм с колодцем 70×100 мм, и многоканального анализатора SBS-79. Образцовая мера приготовления с использованием жидкого радиового эталона и представляет собой сорбционный модуль с содержанием радия $1,26 \times 10^{-9}$ г. Детектор помещен в свинцовую защиту с толщиной стенок 100 мм. Предел обнаружения радона около 1 Бк. Для повторного применения угольный модуль подвергается прокаливанию

при температуре 130⁰С.

Величина потока радона на поверхности земли определяется как отношение количества радона, уловленного сорбционным модулем к площади крышки, закрывающей его на поверхности земли, и времени экспозиции. Один из основных моментов, определяющих истинность измеряемой величины потока, это соотношение площади крышки модуля (S_0) и эффективной (реальной) площади поверхности земли, с которой улавливается выделяющийся радон ($S_{эфф}$).

Выяснение этих и других особенностей методики возможно в условиях контролируемых параметров внешней среды и величины потока радона, что и было реализовано в эксперименте с использованием физической модели эксхалляции радона на поверхности земли (рис. 1).

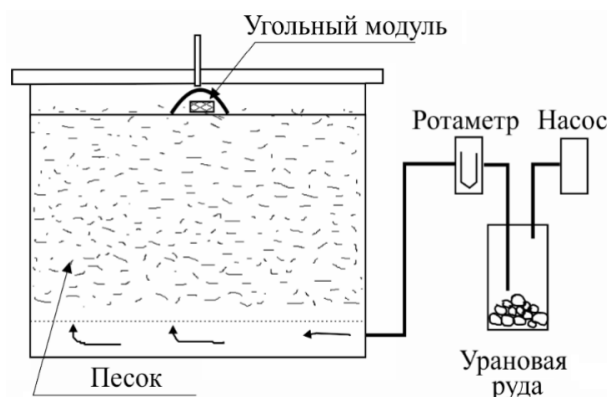


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для улавливания радона сорбционным модулем на поверхности земли.

Соответствующим подбором количества урановой руды в генераторе радона был получен поток радона на поверхности величиной 17 мБк/(м²с). Каждое измерение определялось как среднее из трех измерений активности радона в сорбционном модуле. Для определения активности на поверхность песка на проливаемой прокладке насыпался тонкий слой (1,5 см) активированного угля и закрывался крышкой. Эффективность улавливания радона (~ 99 %) контролировалась сорбцией радона, содержащегося в воздухе, сорбционным модулем.

Измерения проводились после установления стационарного режима газового потока и равновесия радона с его продуктами распада в объеме установки. Результаты эксперимента показаны на рисунке 2а.

Теоретическая кривая построена с условием, что $S_{эфф}=S_0$ и величина потока радона неизменна по всей поверхности. Равенство $S_{эфф}=S_0$ выполняется при диаметре крышки 21 см, при меньших размерах крышки $S_{эфф}>S_0$ и $S_{эфф}<S_0$ для крышек с диаметром, превышающим 21 см. Эти соотношения сохраняются при разных скоростях потока газа носителя 1,6 и 4,0 см³/(м²с).

Для выяснения влияния переходных процессов в первые часы после установки сорбционного модуля на точке наблюдения был проведен эксперимент по

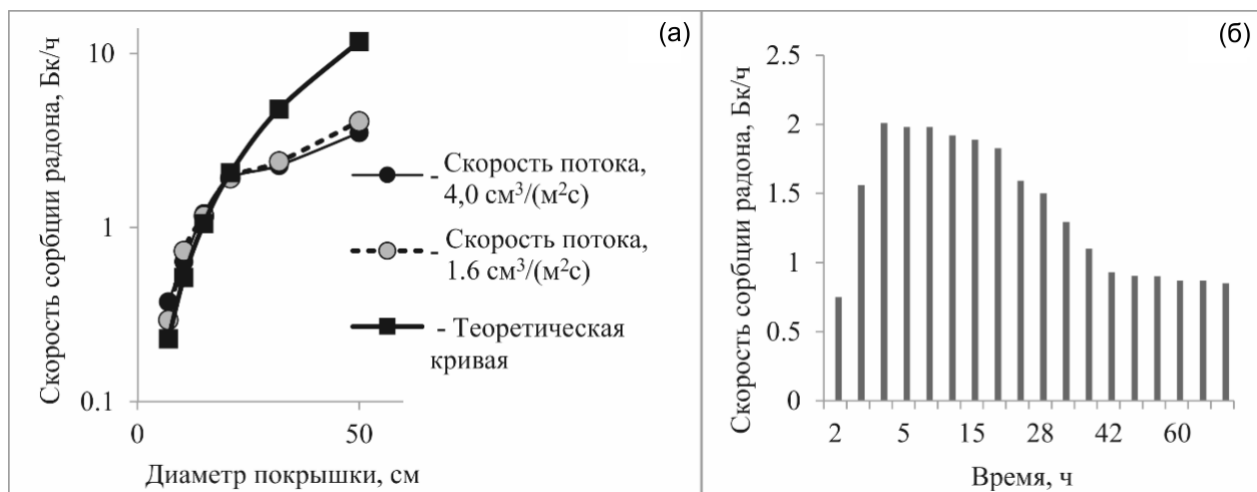


Рис. 2. График зависимости скорости сорбции радона, а – от диаметра покрышки, б – от времени экспозиции на точке наблюдения.

определению зависимости скорости сорбции радона от времени экспозиции. Результаты измерений (рис. 2б) показали, что максимальная скорость сорбции радона достигается через 4 часа, остается практически постоянной при увеличении экспозиции до 20 часов и начинает постепенно снижаться при дальнейшем увеличении экспозиции.

Изменение скорости сорбции радона от нуля до максимального значения в течение первых четырех часов приводит к снижению расчетной величины определяемого потока радона. При экспозиции 10 часов это снижение достигает 20 %. Выяснив характер изменения скорости сорбции радона, несложно учесть в расчетной формуле влияние переходных процессов на определение величины потока радона. Таким образом, длительность экспозиции угольного модуля в течение 12–16 часов представляется наиболее оптимальным в полевых условиях, то есть установка сорбционного модуля на точке наблюдения вечером и измерение активности модулей утром следующего дня.

Для оценки влияния климатических факторов на

результаты измерения потока радона были выполнены режимные наблюдения в естественных условиях. Результаты, полученные на десяти точках по тридцати измерениям в различные периоды года, приведены в таблице 1.

Измерения активности модулей производились после сорбции радона на точке наблюдения в течение 24 часов. Время измерения 4 минуты. Среднее значение относительного стандартного отклонения по всем точкам для зимы и осени равно 21 % (абсолютная величина 2,1). Летом оно несколько выше – 26 % (абсолютная величина 2,6). Примерно такие же значения вариации концентрации радона в почвенном воздухе были получены в работе [10]. Более высокое значение вариации измерений в летний период объясняется относительно высокой влажностью воздуха в это время. Насыщение активированного угля парами воды, при повышенной влажности, приводит к снижению фактического времени сорбции радона и соответственно к занижению значения регистрируемого потока радона.

Таблица 1

Обобщенные данные по тридцати измерениям в различные периоды года

№ точки	Февраль-Март		Июнь-Июль		Сентябрь-Октябрь	
	Q, мБк/м²с	±Δ30	Q, мБк/м²с	±Δ30	Q, мБк/м²с	±Δ30
1	29,4	2,1	19,0	1,8	24,9	1,6
2	18,0	1,7	15,1	2,5	17,3	2,2
3	14,2	2,2	14,0	2,3	16,7	2,0
4	15,8	1,7	17,7	2,4	18,1	2,2
5	13,9	2,0	10,6	2,7	11,1	2,0
6	18,9	1,7	14,2	3,4	17,4	2,8
7	19,5	2,9	12,5	3,6	18,4	2,4
8	22,3	2,6	16,5	2,1	19,9	1,5
9	24,7	1,2	21,6	3,2	25,1	2,5
10	42,6	1,1	21,4	2,3	30,9	1,6

Применение методики измерений с использованием угольного сорбента для исследования процессов выделения и миграции радона

Выделение радона из пород и его миграция к поверхности – сложное природное явление, обусловленное как физико-химическими свойствами пород и минералов, так и структурными особенностями пород. Породы с повышенным содержанием урана, как правило, выделяются увеличением концентрации радона в почвенном воздухе и возрастанием его потока через дневную поверхность. Существенное влияние на выделение радона через дневную поверхность оказывает характер и мощность рыхлых поверхностных отложений. Поскольку период полураспада ^{222}Rn – 3,85 дня и диффузионная длина пробега не превышает первых метров [10], конвективный перенос радона в этих отложениях является одним из основных процессов, определяющих величину его потока. При-

сутствие в разрезе рыхлых поверхностных отложений, малопроницаемых слоев глины может заметно понизить скорость движения радона и соответственно уменьшить величину его потока.

Вариация величины потока радона на поверхности земли во многом определяется наличием неотектонических нарушений различного порядка, их мощностью и положением. Повышенная проницаемость зоны разрывных нарушений, в отдельных случаях накопление урана в глинке трения, приводят к тому, что они проявляются на поверхности земли возрастанием потока радона. Глинка трения играет роль экрана для радона, поднимающегося из нижележащих пород, что приводит к снижению величины потока на поверхности земли непосредственно возле выхода трещины на поверхность. Очевидно, что размеры "те-ни" будут варьировать в зависимости от угла падения разрывных нарушений.

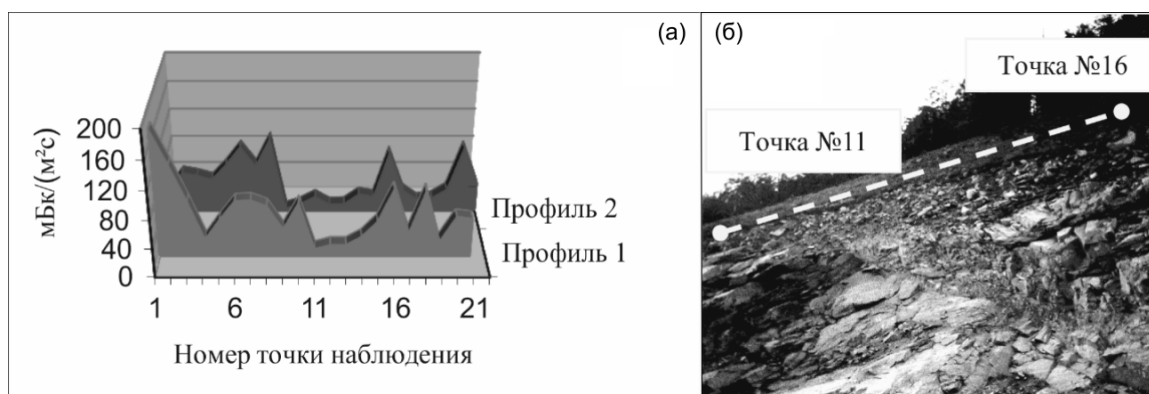


Рис.3. Вариации потока радона над разломом

Обычная для таких условий картина эманационного поля (рис. 3а) была получена над разломом, показанным на рисунке 3б. Расстояние между профилями 50 м, пунктирной линией на рисунке 3б отображено положение Профиля 1 относительно разлома. Выход разлома на поверхность проявляется отчетливым минимумом потока радона протяженностью 30 м (шаг наблюдений 10 м).

Заполнение зоны разрывных нарушений водой приводит к увеличению потока радона на поверхности земли вследствие возрастания коэффициента эманирования пород и увеличения скорости миграции радона к дневной поверхности. Последнее обусловлено тем, что принципиально меняются условия переноса радона. Скорость его подъема к поверхности начинает определяться скоростью восходящих потоков воды и, возможно, скоростью движения попутных газов.

Размеры участков с повышенным уровнем потока радона варьируют в зависимости от мощности разрывных нарушений. На диаграмме (а) рисунка 4 показано изменение потока радона по профилю, пересекающему региональный разлом. Мощность зоны разрывных нарушений, судя по повышенным значениям потока радона, в данном случае около 150 м.

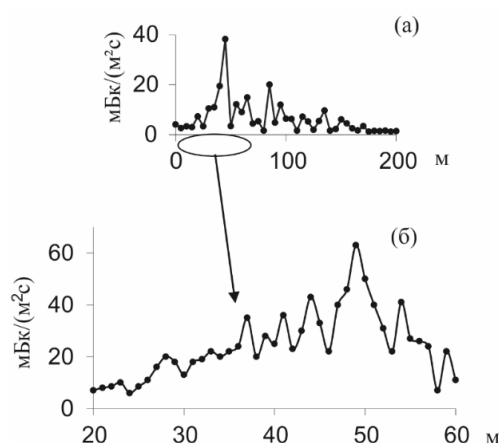


Рис. 4. Вариации потока радона на профиле, пересекающем региональный разлом. Диаграмма: а – общий вид, шаг наблюдений 5 м; б – детализация интервала 20–60 м, шаг наблюдений 1 м.

Результаты детальных наблюдений потока радона (шаг наблюдений 1 м) показали, что радоновая аномалия отчетливо выделяется в интервале 40–50 м (диаграммы (а) и (б), рис. 4). Разнообразие факторов, обуславливающих величину потока радона на поверхности грунта, в большинстве случаев не позволя-

ет однозначно интерпретировать природу радоновых аномалий и вариаций потока. Выяснение особенностей выделения радона в различных точках поверхности становится возможным только в результате дополнительных геологических и геофизических исследований. Хотя, в отдельных случаях, геологические структуры отчетливо проявляются в эманационном поле.

Для оценки нефтегазоносности различных районов наряду с традиционными методами поиска углеводородного сырья используют и радоновую съемку. Результаты измерения потока радона на поверхности земли над нефтяной залежью месторождения Дзуун-Баин (Монголия) показаны на рисунке 5. Профиль начинается от центра залежи по линии, вдоль которой расположены промышленные скважины. Отметка 600 м, обозначенная стрелкой, соответствует границе залежи при её ширине 1200–1500 м и глубине залегания 1500 м. Проекция контура залежи на поверхность земли выделяется повышенными значениями потока радона, который заметно уменьшается за её пределами, где начинает проявляться влияние тектонических нарушений. Относительно низкие значения величины потока радона в непосредственной близости от линии скважин, вероятно, обусловлены проявлением техногенных экранов, образовавшихся вследствие проходки скважин и разливов нефти при её добыче в 60-х годах прошлого века.

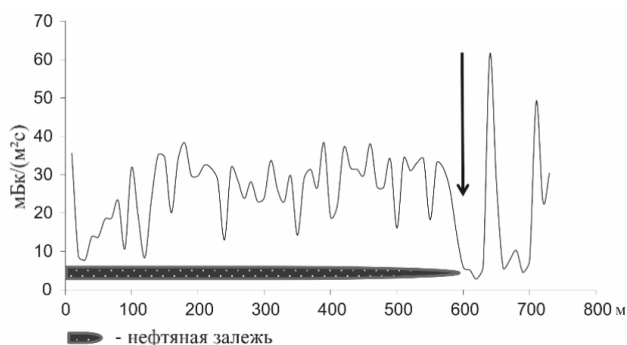


Рис. 5. Вариации потока радона над нефтяным месторождением Дзуун-Баин, Монголия.

В тех случаях, когда имеет место достаточно однородное строение приповерхностных пород и отложений, результаты эманационных измерений позволяют уверенно определять положение источника радона без выполнения дополнительных исследований. Например, такие условия характерны для Хиагдинского уранового месторождения [11]. Урановое оруденение связано с неогеновыми вулканогенно-осадочными породами и локализуется в отложениях русло-пойменной фации. Породы сложены песками с примесью щебня и валунно-галечного материала, малоглинистыми песками, алевролитами. Они обогащены углефицированной растительной органикой. Рудные тела в породах залегают непосредственно на кристаллическом гранитном фундаменте на глубине 165–185 м. Рудоносные отложения перекрыты покровом

базальтов и туфов мощностью 132–136 м. Мощность криолитозоны многолетней мерзлоты 80–100 м. На рис. 6 показано изменение потока радона по профилю, пересекающему одно из рудных тел месторождения.

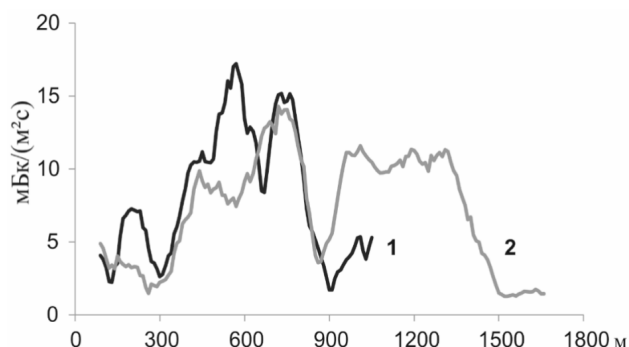


Рис. 6. Сопоставление вариаций потока радона над урановым рудным телом в разные годы (1 – 2000 г., 2 – 2001 г.). Месторождение Хиагда, Россия.

Величина потока измерена дважды с интервалом в один год (линия 1 – измерения проводились в 2000 г., линия 2 – 2001 г.). Сплошными линиями показаны тренды изменения потока, построенные по точкам скользящего среднего для десяти измерений. Участок профиля 300–800 м, соответствующий рудному интервалу, отчетливо выделяется повышенными значениями потока радона в обоих случаях. Это увеличение потока радона однозначно можно связать с проявлением рудного тела, поскольку содержание урана в почвенных пробах остается неизменным по всему профилю (1,5–2 г/т). При выполнении измерения потока радона на второй год протяженность профиля была увеличена. Предполагалось, что удастся выйти на фоновые значения потока радона, поскольку граница рудного тела соответствует отметке 800 м. Достаточно неожиданно оказалось, что после снижения величины потока радона в районе отметок 850–880 м она вновь возрастает до значений, наблюдаемых в пределах рудного интервала. Впоследствии выяснилось, что это повышение потока радона обусловлено проявлением рудного тела с пониженным содержанием урана, которое по этой причине не было показано на предоставленном нам плане.

Заключение

Опыт практического применения методики измерения потока радона с использованием сорбционных модулей показал, что она достаточно эффективна при выполнении исследований по выявлению и уточнению положения урановых рудных тел, тектонических разломов. Сочетание высокой производительности с получением окончательного результата в тот же день позволяет рационально выполнять такие работы, поскольку появляется возможность их оптимизации в зависимости от результатов измерений. Гамма-спектрометр, применяемый для определения содержания радона в сорбционных модулях, может использоваться и для определения содержа-

ния естественных радиоактивных элементов в пробах поверхностных отложений. Интерпретация данных эманационных измерений существенно упрощается при контроле возможного влияния поверхностных ореолов урана.

Тектонические нарушения различного порядка являются основным фактором, определяющим вариации потока радона на поверхности земли. Если основной поток радона создается рудным телом, то эти нарушения позволяют ему достичь земной поверхности. В некоторых случаях, при достаточно большом объеме зоны дробления и хорошей проницаемости пород в этой зоне, создаются условия для формирования повышенного потока радона при ординарных содержаниях урана в породе.

Заполнение зоны разрывных нарушений водой приводит к увеличению потока радона на дневной поверхности, вследствие возрастания коэффициента эманирования пород и увеличения скорости миграции радона к поверхности. Последнее обусловлено тем, что принципиально меняются условия переноса радона. Скорость его подъема к поверхности начинает определяться скоростью восходящих потоков воды и, возможно, скоростью движения попутных газов.

В результате проведенных исследований по измерению потока радона на различных геологических объектах определена оптимальная геометрия измерения. Показано, что использование сорбента объемом 280 см³ позволяет выполнять измерения потока радона в различных природно-климатических условиях с приемлемой точностью. Влияние влажности грунта на процесс сорбции незначительно. Рассмотренную методику рекомендуется применять на многокилометровых экспедиционных маршрутах, картировать значительные земельные участки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сердюкова А. С. Изотопы радона и продукты их распада в природе / А. С. Сердюкова, Ю. Т. Капитанов. – М.: Атомиздат, 1975. – 295 с.
2. Семинский К. Ж. Радоновая активность разнотипных разломов земной коры (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) / К. Ж. Семинский, А. А. Бобров // Геология и геофизика. – 2009. – Т.50, № 8. – С. 881–896. doi: 10.1016/j.rgg.2008.12.010
3. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде / А. М. Маренный [и др.]. – М.: Изд-во Перо, 2016. – 394 с.
4. Яковлева В. С. Способ совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности грунта по альфа-излучению / В. С. Яковлева, А. В. Вуколов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т.317, №2. – С. 167–170.
5. Разведочная ядерная геофизика: Справочник геофизика. М.: Недра, 1986. – 432 с.
6. Методика измерения плотности потока с поверхности земли и строительных конструкций. – М.: НТЦ «НИТОН», 1993. – 7 с.
7. Tsapalov A. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface / A. Tsapalov, K. Kovler, P. Miklyaev // Journal of Environmental Radioactivity. – 2016. – V. 160. – P. 28–35.
8. Экспозиционные эманационные методы поисков месторождений полезных ископаемых / В. К. Титов [и др.]. – Л.: Недра, 1985. – 132 с.
9. Ruckerbauer F. Radon concentration in soil gas: a comparison of methods / F. Ruckerbauer, R. Winkler // Applied Radiation and Isotopes. – 2001. – Vol. 55. – P. 273–280.
10. Bunzl K. Temporal and small-scale spatial variability of ²²²Rn gas in a soil with a high gravel content / K. Bunzl, F. Ruckerbauer, R. Winkler // The Science of the Total Environment. – 1998. – Vol. 220. – P. 157–166.
11. Потоки рассеяния урана и сопутствующих элементов над гидрогенными U-рудными телами, перекрытыми покровом базальтов (На примере Хиагдинского месторождения) / А. М. Плюсин [и др.] // Геохимия. – 2005. – № 7. – С.763–771.

Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ

Бартанова Светлана Викторовна, младший научный сотрудник

E-mail: bartanova@list.ru

Тел.: +7 301-243-32-11

Перевалов Александр Владимирович, ведущий инженер, кандидат геолого-минералогических наук

E-mail: perevalov@gin.bscnet.ru

Тел.: +7 301-243-32-11

Цыденов Александр Базарович, инженер

E-mail: tsydenov@gin.bscnet.ru

Тел.: +7 301-243-32-11

Geological Institute of SB RAS, Ulan-Ude

Bartanova S. V., Junior Researcher

E-mail: bartanova@list.ru

Tel.: +7 301-243-32-11

Perevalov A. V., Lead Engineer, Candidate of Geology and Mineralogy Sciences

E-mail: perevalov@gin.bscnet.ru

Tel.: +7(301-2) 43-32-11

Tsydenov A. B., Engineer

E-mail: tsydenov@gin.bscnet.ru

Tel.: +7 301-243-32-11